

## 研究報告 19

社団法人 電子情報通信学会  
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,  
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報  
IEICE Technical Report  
Vol.110, No.66, LQE2010-2

## 差周波同期サンプリング法を用いた超高速テラヘルツ波形計測

谷 正彦<sup>1</sup> 古屋 岳<sup>1</sup> 堀田和希<sup>1</sup> 山本晃司<sup>1</sup> 宮丸文章<sup>2</sup> 西澤誠治<sup>3</sup>

1 福井大学遠赤外領域開発研究センター 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

2 信州大学理学部 〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

3 (株)先端赤外 〒193-0835 東京都八王子市千人町 3-17-16

E-mail: tani@fir.u-fukui.ac.jp

**あらまし** 新たな非同期光サンプリングである「差周波同期サンプリング」法を用いた超高速テラヘルツ(THz)波測定を報告する。差周波同期サンプリングでは、周期間隔が一定量増加(または減少)する光パルス列、およびその1周期間隔遅れた光パルス列をポンプ光およびプローブ光として用いる。測定時間窓 156ps の THz 波形を 3ms で測定することに成功した。しかし、レーザーのタイミングジッター(〜10ps)のため THz スペクトルの測定帯域が制限されている。今後、測定帯域を拡げるためにはレーザー光源のタイミングジッターを低減する必要がある。

**キーワード** テラヘルツ波, テラヘルツ時間領域分光, 非同期光サンプリング

## Ultrafast Terahertz Wave Measurement Based on a New Asynchronous Sampling Method

Masahiko TANI<sup>1</sup> Takashi FURUYA<sup>1</sup> Kazuki HORITA<sup>1</sup> Kohji YAMAMOTO<sup>1</sup> Fumiaki MIYAMARU<sup>2</sup> and Seizi NISHIZAWA<sup>3</sup>

1 Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan

2 Faculty of Science, ShinShu University 3-1-1 Asahi, Matsumoto 390-8621, Japan

3 Advanced Infrared Spectroscopy Co., Ltd. 3-17-16 Sen-nin-cho, Hachioji 193-0835, Japan

E-mail: tani@fir.u-fukui.ac.jp

**Abstract** We report ultrafast terahertz-wave measurements based on a new asynchronous sampling method, “difference frequency sampling”, where an optical pulse train with its interval is incremented by a constant time period and its one-cycle delayed pulse train is used as the pump and probe pulse trains. We demonstrated a 3-msec single-scan measurement for THz wave with a 156-ps time window. The relatively large timing-jitter (〜10ps) of the laser limited the measurement spectral bandwidth and should be reduced to extend the measurement spectral bandwidth.

**Keyword** THz Wave, THz time-domain spectroscopy, Asynchronous optical sampling

## 1. はじめに

光伝導アンテナ等を用いたテラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, 以下 THz-TDS と略記) は品質管理や危険物探知などへの応用が期待される。しかしながら、同手法では一般的に機械式遅延ステージを使用したポンプ・プローブ方式が用いられるため、1 波形の取得に通常数分程度を要する。この測定時間が産業利用への妨げとなっている。近年、非同期光サンプリング (Asynchronous Optical

Sampling, 以下 AOS と略記) により、機械式時間掃引に比べ、3 桁程度の測定時間の短縮が報告され[1], THz-TDS の産業利用への期待が高まっている。AOS は高速サンプリング法として優れた手法であるが、以下のような問題点がある。

- (i) 測定時間窓 (遅延時間の掃引時間幅) は励起レーザーの繰返し周期に固定される。したがって、通常用いられるモード同期型のフェムト秒レーザーでは 10ns 前後の測定時間窓(その逆数が測定の周波数分解上限になる)となるが、高周波数分

解を要しない応用では、データ取得の無駄時間が多くなる。

- (ii) 2 台の繰返し周波数がわずかに異なるレーザーが必要で、その繰返し周波数を精密に制御、安定化するため、必然的にシステムが高価かつ複雑になる。

我々は AOS の問題点を改善し、AOS よりも測定時間を 1 桁以上短縮することを目的として、新たなサンプリング方式である「差周波同期サンプリング」を提案し、その原理実証実験を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 差周波同期サンプリングの原理

差周波同期サンプリングでは 1 台の繰返し周波数可変レーザーをポンプ及びプローブ光源とし、ポンプ光またはプローブ光の光路にレーザーの基準繰返し周波数の 1 周期分に相当する時間遅延を与える。レーザーの繰返し周波数を連続的に変化させることで、ポンプ光またはプローブ光の時間掃印が可能となる。差周波同期サンプリングのタイミングチャートを図 1 に示す。図 1 ではレーザーの光パルス列の周期は、初期周期  $T$  から  $\Delta t$  ずつ増加する。1 周期遅れのパルス列と元のパルス列を重ねると（一方がポンプ光パルス、もう一方がプローブ光として THz 波の発生とサンプリングに用いられる）、2 つの光パルスの相対遅延時間はパルスごとに  $\Delta t$  ずつずれていく。このようにして、繰返し周期（あるいは繰返し周波数）は変化するが、AOS と同様に機械的な走査なしに、遅延時間を自動掃印できる。また繰返し周期の制御により、測定時間窓は任意に設定できるので、必要な周波数分解に合わせて設定できる。例えば 100MHz のモード同期レーザーを用いた AOS では、繰返し周期は 10ns であり、測定時間窓も 10ns となる（周波数分解は繰返し周波数と同じ 100MHz）。しかし必要な測定時間窓が、波形中心付近の 100ps であるなら、9.9ns は無駄な計測時間となる。一方、差周波同期サンプリングではレーザーの繰返し周波数を制御して、測定時間窓を 100ps にできるので、無駄時間がなく、上の例では AOS に比べて測定時間を 1/100 に短縮できる。また無駄時間がなくなった分、



図 1 差周波同期サンプリング概念図  
同じ測定時間で信号対雑音比(SNR)も向上する（上の

例では SNR は 10 倍改善される）。

## 3. 実験

励起光源には繰返し周波数可変のファイバーレーザー（波長 780 nm, 平均出力 30 mW, パルス幅 130 fs, 基準繰返し周波数 40 MHz）を使用した。ポンプ光の光路長をプローブ光に対し 7.5 m 長く取ることにより、40 MHz の繰返し周期に相当する時間遅延を与えた。本実験ではレーザーの繰返し周波数を 39.85MHz から 40.10 MHz まで測定時間 3 msec（繰返し 333Hz）で変化させた。この周波数掃引幅は測定時間窓 156 ps に相当し、3 msec の掃引時間は約 13 万点の測定点数に相当する。エミッターにはボウタイ型光伝導アンテナを使用し、100 Vp-p, 100 kHz のバイアス変調を与えた。スパイラル型光伝導アンテナで THz 波を受信し高速応答可能な電荷アンプで増幅後、高速ロックインアンプを用いてロックイン検出を行なった。

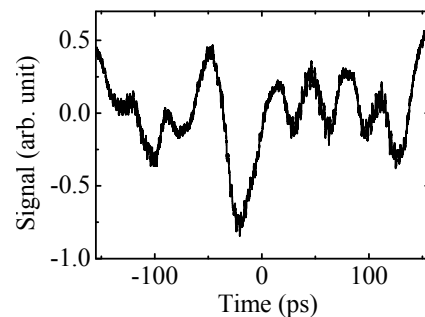


図 2 差周波同期サンプリングにより取得した THz 時間波形。測定時間 3ms, 測定時間窓 156 ps。

## 4. 結果と考察

得られた時間波形を図 2 に示す。反射によるベースラインの歪みはあるものの 0 ps 付近に THz 波形ピークを得た。ピーク位置のずれは遅延経路が 7.5 m から僅かにずれていたためである。この結果から、3 ms の掃引時間で時間窓 156 ps の THz 波形が測定可能であることを確認できた。一方、測定波形は自動ステージを用いた遅延時間走査の場合よりもかなり広がっている（したがってスペクトル帯域が狭い）。これは用いたレーザーのタイミングジッターに起因すると思われる。相互相関によるタイミングジッターは 10ps 弱であった。今後、波形測定の時間分解を改善する、すなわち測定のスペクトル帯域を拡げるためには、レーザー光源のタイミングジッターを低減する必要がある。

本研究は JST 先端計測分析技術・機器開発事業による助成を受けて行われた。

## 文 献

- [1] T. Yasui, E. Saneyoshi, and T. Araki: Appl. Phys. Lett. **87**, 061101 (2005).